

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

ТАШКЕНТСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ

Кафедра: “Теплотехника и автотракторные двигатели”

**Методические указания к лабораторным работам по курсу
«Теплотехника»**

Ташкент – 2005

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Теплотехника» составлены на основе рабочей программы, утвержденной на заседании научно-методического Совета Ташкентского автомобильно-дорожного института 18.09.2001 г. пр. № 1.

Составители: ст. преп. К.И.Магдиев
асс. С.А.Калауов

Рецензенты: к.т.н., доц. Б.И.Базаров
к.т.н., доц. А.Л.Барханаджян

Методические указания обсуждены на заседании кафедры «Теплотехника и автотракторные двигатели» (Протокол № ____ от « ____ » _____ 2005 г.).

Зав. кафедрой

проф. С.М.Кадыров

Методические указания утверждены на заседании научно-методического совета кафедр по специальным дисциплинам (НМС КСД) ТАДИ.

Протокол № ____ от « ____ » _____ 2005 г.

Председатель НМС КСД ТАДИ

к.т.н., доц. М.З. Мусаджанов

Лабораторная работа №1

«ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ»

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является закрепление знаний студентов о температуре как важном термодинамическом параметре системы, ознакомление их с основными методами измерения температуры и особенностями термометров различного типа.

2. ПОНЯТИЕ О ТЕМПЕРАТУРЕ

Часто в обыденном разговоре слово «температура» звучит как синоним тепла, но в науке эти слова означают совершенно разные понятия. Теплом мы называем ту «субстанцию», которая делает предметы горячее, т.е. форму энергии.

ТЕМПЕРАТУРА – это степень нагретости тел по определенной шкале.
--

Для грубой оценки без термометра можно воспользоваться чувствительностью собственной кожи, но наши ощущения тепла и холода ограничены и ненадежны. Так, например, если опустить на 1...2 *минуты* одну руку в горячую воду, а другую в холодную, затем обе руки опустить в теплую, то эта теплая вода покажется одной руке, которая раньше находилась в горячей воде – холодной, а другой руке, которая раньше находилась в холодной воде – горячей. Термометры же нам точно покажут, насколько предметы горячее или холоднее: с их помощью можно сравнить степень нагретости разных предметов; пользуясь ими вновь и вновь, мы можем сопоставить наблюдения, сделанные в разное время. Они снабжены определенной неизменной шкалой. Переход от грубых ощущений к прибору со шкалой – не просто усовершенствование нашего осязания, а является введением нового понятия – температуры.

Исследования показывают, что при нагревании многие из важнейших свойств вещества изменяются и для изучения этих изменений применяются термометры. Повсеместное распространение термометра в обиходе отодвинуло на второй план смысл понятия температуры.

Температуру в термометрах, например, показывают расширяющаяся при нагревании капля жидкости, помещенная в трубку с делениями. Чтобы шкала одного термометра совпадала с другой, мы берем две точки: таяние льда и кипение воды в нормальных физических условиях и приписываем им деления 0 и 100, а интервал между ними делим на 100 равных частей. При этом получается, так называемая шкала Цельсия, которая сейчас широко используется. При таком подходе к измерению температуры цена деления шкалы, строго говоря, должна зависеть от вида жидкости, помещенной в трубку термометра. Следовательно, этими термометрами мы измеряем относительную температуру.

Путь к созданию единой температурной шкалы, не связанной с какими-либо частными термометрическими свойствами, основан на втором законе термодинамики. Она получила название термодинамической температурной шкалы и основана на следующем положении.

Если, в обратимом цикле Карно тело, совершающее цикл, поглощает теплоту Q_1 при температуре T_1 и отдает теплоту Q_2 при температуре T_2 , то отношение термодинамических (абсолютных) температур T_1/T_2 равно отношению количества теплот Q_1/Q_2 .

Согласно положениям термодинамики, значения этого отношения не зависят от свойств рабочего тела. Однако, термодинамическая температурная шкала, являющаяся чисто теоретической, не может быть использована на практике без установления связи с реальными приборами для измерения температур. Из числа измерителей температуры наибольшее внимание заслуживают газовые термометры, показания которых могут быть связаны с термодинамической температурной шкалой посредством введения понятия шкалы идеального газа. Отказавшись от жидкостных термометров в пользу газовых, мы несколько приближаемся к истинной температуре. При охлаждении такого термометра давление газа падает. Экстраполируя это поведение до все меньших и меньших температур, мы приходим к абсолютному нулю, при котором газ приходит к нулевому объему в термометре или нулевому давлению. Тщательные измерения показали, что абсолютный нуль помещается на шкале Цельсия при $-273,15^\circ\text{C}$ независимо от вида газа.

Кинетическая теория газов утверждает, что давление газа изменяется пропорционально средней кинетической энергии. Поскольку в газовой температурной шкале давление пропорционально абсолютной температуре, то, комбинируя эти два соотношения, имеем: кинетическая энергия молекул пропорциональна абсолютной температуре.

Следовательно, температура приобретает следующий смысл:

АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА измеряет среднюю кинетическую энергию молекул газа.

К сожалению, это утверждение нельзя распространить на молекулы и атомы жидкостей и твердых тел из-за возникновения квантовых ограничений, связанных с колебательными движениями частиц.

Такой подход к определению температуры, хотя и приближает нас к истинному смыслу температуры, все же, говоря по совести, мы не знаем, что такое температура, и, по-видимому, вряд ли узнаем больше того, что она определена на основе избранной нами процедуры измерения.

Первые создатели термометра выбирали в качестве физического свойства объем жидкостей (воды, спирта, ртути и т.д.). Позднее же, остановились на давлении образца газа. Можно также воспользоваться электропроводностью, термоэлектричеством и т.д.

Соотношение между температурой T , измеренной по термодинамической температурной шкале (по газовому термометру), и температурой t , измеренной по шкале Цельсия, следующее:

$$T = t + 273,15 \text{ K}$$

Приборы, с помощью которых измеряются численные значения температуры, называются **ТЕРМОМЕТРАМИ**.

Ниже ознакомимся с принципами действия и конструкционными особенностями различных термометров наиболее часто используемых в нашей практической деятельности.

3. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕРМОМЕТРОВ

Термометры, в зависимости от используемых физических свойств веществ, подразделяются на:

1. **Термометры расширения.** Принцип работы которых основан на измерении изменения объема жидкостей в зависимости от температуры.
2. **Манометрические термометры.** Принцип действия таких термометров основан на зависимости давления газов, паров и жидкостей от температуры в замкнутом объеме.
3. **Термометры сопротивления.** Принцип действия таких термометров основан на измерении изменения электрического сопротивления металлов в зависимости от температуры.
4. **Термоэлектрические термометры.** Эти термометры построены на свойстве разнородных металлов и сплавов образовывать в паре (спае) термоэлектродвижущую силу в зависимости от температуры спаея.
5. **Пирометры.** Эти термометры работают по принципу измерения излучаемой энергии нагретыми телами, зависящей от температуры поверхности этих тел.

ТЕРМОМЕТРЫ РАСШИРЕНИЯ

К данной группе термометров относятся жидкостные стеклянные термометры. Пределы измерения данных термометров: $-190 \dots +650$ °С.

Принцип действия жидкостных стеклянных термометров основан на тепловом расширении жидкости в стеклянном резервуаре. В качестве рабочих веществ используют ртуть и органические жидкости – этиловый спирт, толуол, пентан и др. Для изготовления этих термометров применяют специальное термометрическое стекло, обладающее небольшим температурным коэффициентом (рис.1.1).

Пределы измеряемых температур зависят от физических свойств термометрических веществ: нижний – от температуры замерзания, верхний – от температуры кипения. Для повышения верхнего предела ртутных термометров над ртутью в капилляре помещается инертный газ под давлением свыше 2.0 МПа.

Основными достоинствами стеклянных термометров являются их простота, сравнительно высокая точность измерения, несложность в обращении и дешевизна. Эти факторы определяют весьма большое их распространение

К недостаткам жидкостно-стеклянных термометров относятся хрупкость, невозможность передачи показаний на расстояние и небольшой диапазон измерений.



Рис. 1.1.

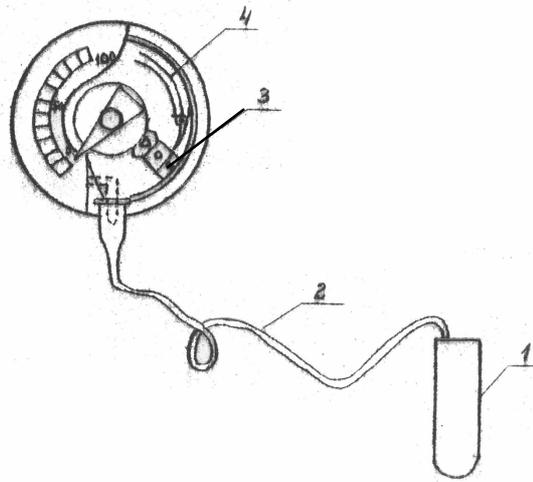


Рис. 1.2.

МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Принцип действия манометрических термометров основан на зависимости давления жидкости, газа или пара с жидкостью в замкнутом объеме от температуры. Манометрические термометры являются показывающими и самопишущими приборами. В зависимости от заключенного в термосистеме рабочего вещества манометрические термометры разделяются на газовые, жидкостные и конденсационные.

Пределы измерения данных термометров: $-160...+600$ °С.

Газовые манометрические термометры заполняются азотом. Термометры имеют равномерную шкалу, так как согласно закону Шарля, при постоянном объеме:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

где p_1 и p_2 – начальное и конечное давление рабочего вещества, МПа;

T_1 и T_2 – начальная и конечная температура рабочего вещества, К.

Жидкостные манометрические термометры заполняются органическими жидкостями, имеющими линейную зависимость изменения давления от температуры.

Конденсационные манометрические термометры имеют в качестве рабочего вещества низкокипящие органические жидкости (хлористый метил, ацетон, фреон). Действие этих приборов основано на законе Дальтона, дающем однозначную зависимость между давлением и температурой насыщенного пара. Конденсационные термометры имеют неравномерную шкалу.

Конструкция манометрического термометра показана на рис.1.2. Он состоит из термобаллона – 1, соединительного капилляра – 2 и механизма – 3, в котором упругим элементом является одновитковая трубчатая пружина – 4.

При повышении температуры термобаллона увеличение давления рабочего вещества передается через капилляр трубчатой пружине и вызывает раскручивание последней до тех пор, пока действующее на нее усилие, пропорциональное разности давлений в системе и окружающем воздухе, не уравновесится силой ее упругой деформации.

Достоинствами манометрических термометров являются: автоматическая запись показаний, возможность установки прибора на некотором расстоянии от места измерения, благодаря капилляру и большая механическая прочность.

К недостаткам манометрических термометров относятся: невысокая точность измерения, большая инерционность вследствие значительных размеров термобаллона, необходимость строгой герметизации системы, что приводит к удорожанию прибора, а также трудности ремонта при нарушении герметичности термосистемы.

ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Для измерения температуры широкое применение получили термометры сопротивления, действие которых основано на измерении изменения электрического сопротивления металлических проводников в зависимости от температуры. Металлы, как известно, увеличивают при нагреве свое сопротивление. Следовательно, зная зависимость сопротивления проводника от температуры и определяя это сопротивление при помощи электроизмерительного прибора, можно судить о величине температуры.

Пределы измерения данных термометров: $-200...+650$ °С.

Для изготовления термометров сопротивления наиболее пригодными металлами являются платина (*Pt*) и медь (*Cu*).

На рис.1.3 приведена схема платинового термометра сопротивления. Чувствительный элемент термометра представляет собой платиновую спираль 1 из тонкой проволоки, помещенную на кварцевый или фарфоровый каркас 2 геликоидной формы. К концам спирали припаяны выводы 3 из платиновой проволоки – по два с каждого конца. Все устройство помещено в защитную кварцевую трубку 4. На верхнем конце трубки крепится, так называемая, головка термометра 5, к которой снизу подходят четыре вывода от чувствительной части термометра.

На рис.4 приведена принципиальная схема потенциметрического способа измерения температуры. На схеме: Б – источник тока, R – регулировочное сопротивление, R_N – образцовое нормальное сопротивление, R_t – термометр сопротивления, П – потенциометр.

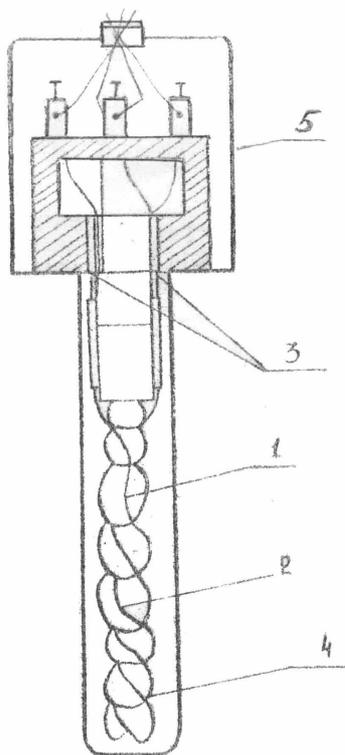


Рис. 1.3.

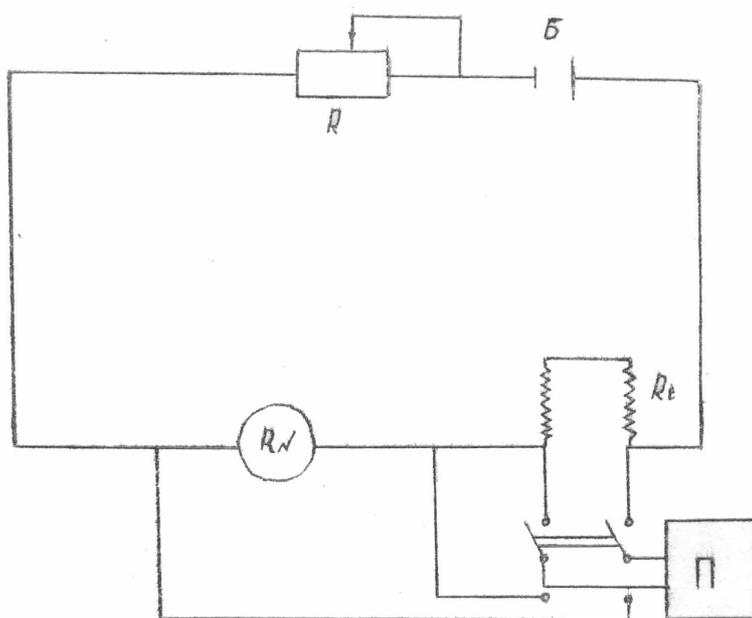


Рис. 1.4.

Достоинствами термометра сопротивления являются: высокая точность измерения, легкость осуществления автоматической записи и дистанционной передачи показаний, возможность подсоединения к одному вторичному прибору нескольких однотипных термометров через переключатель, возможность применения термометра в условиях вибрации, отсутствие необходимости частых проверок.

К недостаткам этих приборов относятся: потребность в постороннем источнике тока, сложность в работе с термометром, высокая стоимость.

Наряду с термометрами сопротивления из металлических проводников для измерения температуры находят также применение полупроводниковые термометры сопротивления – терморезисторы, изготавливаемые из порошкообразной смеси окислов некоторых металлов: меди (Cu_2O_3), марганца (Mn_2O_3), кобальта (CoO), никеля (NiO) и др., спрессованной и спеченной при высокой температуре.

В отличие от металлических термометров сопротивления терморезисторы при нагревании уменьшают свое сопротивление.

Терморезисторы имеют чувствительность больше, чем металлические термосопротивления, так как у них сравнительно большое изменение сопротивления в зависимости от температуры.

Кроме того, значительное удельное электрическое сопротивление терморезисторов позволяет получать из них компактные и малоинерционные термометры.

Однако терморезисторы не обеспечивают необходимую взаимозаменяемость и термическую стабильность.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Принцип действия термоэлектрических термометров основан на свойстве металлов и сплавов создавать термоэлектродвижущую силу (Т.Э.Д.С.), зависящую от температуры места соединения (спая) концов двух разнородных проводников (термоэлектродов), образующих чувствительный элемент термометра – термопару.

Пределы измерения данных термометров: $-50 \dots +1800 \text{ } ^\circ\text{C}$.

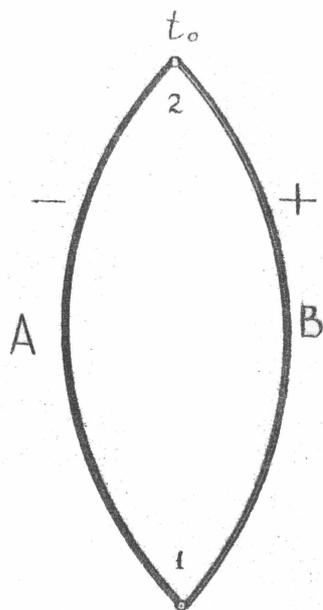


Рис. 1.5.

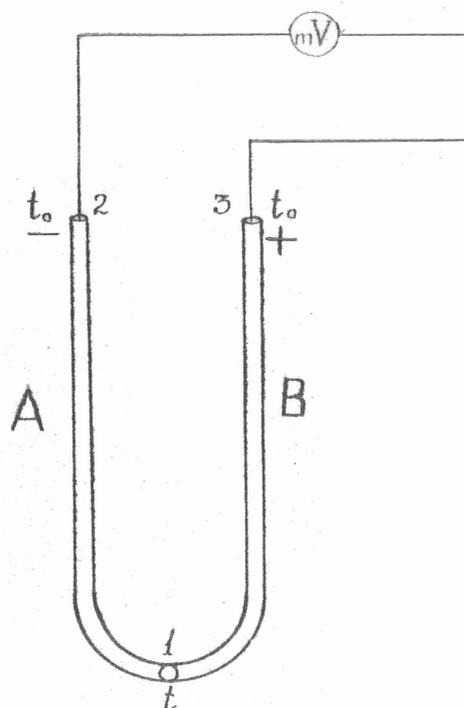


Рис. 1.6.

Явление термоэлектричества заключается в том, что в замкнутом контуре (рис.1.5), состоящем из двух разнородных проводников, возникает электрический потенциал, если места спаев проводников имеют различные температуры. Спай 1, погружаемый в измеряемую среду, называется рабочим концом термоэлектрического термометра, а спай 2 – свободным концом. Термоэлектроды термометра обозначаются знаками ”+” и ”-”.

Для измерения термо-Э.Д.С. к термоэлектрическому термометру посредством соединительных проводов подключается вторичный прибор, образующий с ним замкнутую цепь (рис.1.6).

В качестве термоэлектродных материалов применяется, главным образом, чистые металлы и сплавы. Наибольшее распространение получили: платина, платинородий, хромель, алюмель и копель. В лабораторных установках находят также применение медь, железо и константан.

В качестве вторичных приборов, применяемых для измерения термо-Э.Д.С. применяют милливольтметры или потенциометры.

Экспериментальная зависимость термо-Э.Д.С. от температуры рабочего конца t при постоянной температуре свободного конца t_0 , обычно равной 0°C , называется градуировочной характеристикой термоэлектрического термометра. На основании

ее составляются градуировочные таблицы и графики для практического пользования.

Достоинствами термоэлектрических термометров являются: большой диапазон измерения, высокая чувствительность, незначительная инерционность, отсутствие постороннего источника тока, легкость осуществления дистанционной передачи показаний и возможность измерения температуры в точке.

ПИРОМЕТРЫ

Пирометры применяются для измерения температуры тел в диапазоне +300... +6000 °С. Действие этих приборов основано на зависимости теплового излучения тел от их температуры и физико-химических свойств. В отличие от других термометров первичный преобразователь пирометра не подвергается влиянию высокой температуры и не искажает температурного поля, так как находится вне измеряемой среды.

Измерение температуры основано на определении теплового излучения, испускаемого телами.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятие о температуре.
2. Как термометры используются в автомобилях и тракторах?
3. Принцип действия, конструкция, достоинства и недостатки приборов для измерения температуры.

5. ЛИТЕРАТУРА

1. Теплотехника. Учебник для ВУЗов (В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер. – М.: Высшая школа, 1999 г.
2. Теплотехника. Под ред. В.Н. Крутова. – М.: Высшая школа, 1986 г.
3. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высшая школа, 1980 г.

Лабораторная работа №2

«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИЛЛЮСТРАЦИЯ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ»

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является закрепление знаний студентов о внутренней энергии, теплоте, работе и первом законе термодинамики. Проиллюстрировать на основе опыта физический смысл этого закона.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В своей практической деятельности человек сталкивается с различными процессами, связанными с превращением одних видов энергии в другие. Как известно, энергия не исчезает и не возникает из ничего, а только переходит из одной формы в другую.

В 1842 году Р. Майер установил эквивалентность теплоты и механической работы, не зависящую от характера превращения энергии.

Закон сохранения энергии устанавливает, что энергия не создается, не уничтожается и, что одна форма энергии может переходить в другую; при этом превращение совершается таким образом, что определенное количество одной формы энергии переходит в равное количество другой формы энергии. Первый закон термодинамики по существу является частным случаем закона сохранения энергии. Он устанавливает количественную зависимость между подводимой теплотой, ее внутренней энергией и совершаемой работой.

Первый закон термодинамики формулируется так:

Теплота Q , подведенная к системе, расходуется на изменение внутренней энергии системы ΔU и на совершение внешней работы L , против сил, действующих на данную систему.

$$Q = \Delta U + L$$

Количество энергии, передаваемой в результате макроскопического движения микрочастиц, называется **РАБОТОЙ**.

Количество энергии, передаваемое в результате обмена хаотическим, ненаправленным движением микрочастиц, называется **ТЕПЛОТОЙ**.

Количество теплоты в термодинамическом процессе является мерой тепловой энергии, подведенной к системе или отведенной от нее. Не следует говорить о количестве теплоты, содержащейся в теле, а можно говорить лишь о том, сколько тело отдало или получило теплоты в том или ином процессе. В отличие от внутренней энергии работа и количество теплоты зависят не только от начального и конечного состояния газа, но и от пути, по которому происходило изменение его состояния.

Количество теплоты, полученное телом, принято считать положительным, а отданное телом – отрицательным.

Количество теплоты и работы измеряются в одних и тех же единицах – джоулях (Дж).

Кинетическую энергию микроскопических тепловых движений молекул и потенциальную энергию их взаимодействия называют ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИЕЙ.

В любом состоянии система, изолированная от внешней среды или находящаяся во взаимодействии с ней, располагает определенным количеством внутренней энергии U . Если состояние системы изменилось в результате любого термодинамического процесса, то изменение ее внутренней энергии не зависит от того, как протекал процесс, а зависит только от конечного и начального состояния рабочего тела. Поэтому полное изменение энергии тела в процессе определяются разностью значений энергии в начале и конце взаимодействия тела с внешней средой.

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

Термодинамика не занимается определением абсолютного значения внутренней энергии, а рассматривает лишь его изменение ΔU .

3. ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Принципиальная схема опытной установки, иллюстрирующей первый закон термодинамики, приведена на рис.2.1.

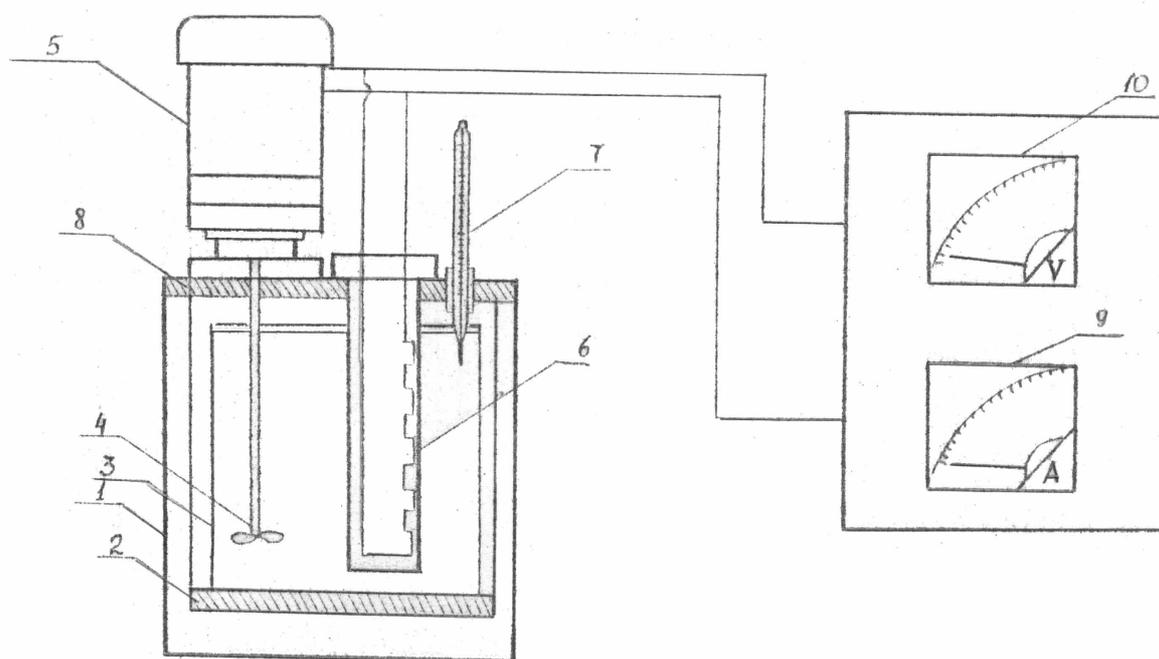


Рис. 2.1.

Опытная установка состоит из стального цилиндрического двустенного сосуда 1 с двойным дном, на котором устанавливается теплоизоляционная подставка 2. Внутри термостата на теплоизоляционной подставке помещается калориметрический сосуд 3, заполненный определенным количеством воды, в котором располагается мешалка 4, приводимая в движение электромотором 5. В калориметрическом сосуде находится электронагреватель 6 в стальном корпусе и ртутный стеклянный термометр 7. Электронагреватель установлен на крышке сосуда 8 и питается от электросети напряжением 220 В. Электрическая мощность,

потребляемая нагревателем 6, измеряется при помощи амперметра 9 и вольтметра 10.

4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

1. Подготовить таблицу испытания.
2. Измерить начальную температуру t_1 в калориметрическом сосуде при помощи стеклянного термометра и занести ее в таблицу.
3. Включить лабораторную установку в сеть переменного тока в 220 В.
4. Включить электронагреватель и одновременно секундомер.
5. Снять показания амперметра и вольтметра и занести результаты в таблицу.
6. Через 10 минут записать показания термометра t_2 в таблицу, предварительно включив мешалку на 10-15 секунд.

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА

1. Вычислить количество теплоты Q , подводимое к системе

$$Q = I \cdot U \cdot \tau,$$

где I – сила тока, ампер;
 U – напряжение, вольт;
 τ – время продолжительности опыта, сек.

2. Вычислить изменение внутренней энергии ΔU в результате нагрева системы от t_1 до t_2

$$\Delta U = \sum C_{Pi} \cdot m_i \cdot \Delta t,$$

где $\sum C_{Pi} \cdot m_i$ – сумма произведений изобарных теплоемкостей отдельных частей системы (воды, сосуда, мешалки и др.) на их массу, которая равна 45000 Дж/град;

$\Delta t = t_2 - t_1$ – изменение температуры системы, град.

3. Согласно первому закону термодинамики

$$Q = \Delta U + L,$$

где L – работа, совершаемая системой.

В данном опыте $L=0$, т.е. система не совершает работу.

Следовательно:

$$Q = \Delta U,$$

т.е.
$$I \cdot U \cdot \tau = \sum C_{Pi} \cdot m_i \cdot \Delta t$$

4. Сравнить полученные значения Q и ΔU и определить абсолютную погрешность опыта

$$\delta = |Q - \Delta U|$$

5. Вычислить относительную ошибку опыта

$$\sigma = \frac{\delta}{Q} \cdot 100\%$$

6. ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ

Отчет по выполненной работе должен содержать следующее:

1. Краткое описание работы.
2. Принципиальная схема установки.
3. Обработка результатов опыта (привести все расчеты).
4. Таблица результатов испытания.

Таблица 2.1.

№	τ, c	I, A	U, B	$Q, Дж$	$t_1, ^\circ C$	$t_2, ^\circ C$	$\Delta U, Дж$	$\delta, Дж$	$\sigma, \%$
1									
2									
3									
4									
5									

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятие о внутренней энергии.
2. Понятие о теплоте.
3. Понятие о работе.
4. Первый закон термодинамики.

8. ЛИТЕРАТУРА

1. Теплотехника. Учебник для ВУЗов (В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер. – М.: Высшая школа, 1999 г.
2. Теплотехника. Под ред. В.Н. Крутова. – М.: Высшая школа, 1986 г.
3. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высшая школа, 1980 г.

Лабораторная работа №3

«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ВОЗДУХА»

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является закрепление знаний студентов по основным термодинамическим процессам изменения состояния идеального газа и экспериментальное определение показателя адиабаты воздуха.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Известно, что термодинамические процессы сопровождаются изменением состояния газа, т.е. изменением параметров системы (v, p, T). Однако, бывают такие термодинамические процессы, при которых один из параметров системы, или некоторый комплекс величин, остается неизменным. Такими процессами являются: изохорный ($v=const$), изобарный ($p=const$), изотермический ($T=const$), адиабатный ($s=const$) и политропный ($pV^n=const$).

Изохорный процесс – процесс, происходящий при постоянном объеме, который описывается законом Шарля.

При изохорном процессе изменение абсолютного давления прямо пропорционально изменению абсолютной температуры.

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Изохорный процесс можно графически изобразить на pV и Ts диаграммах следующим образом (рис.3.1).

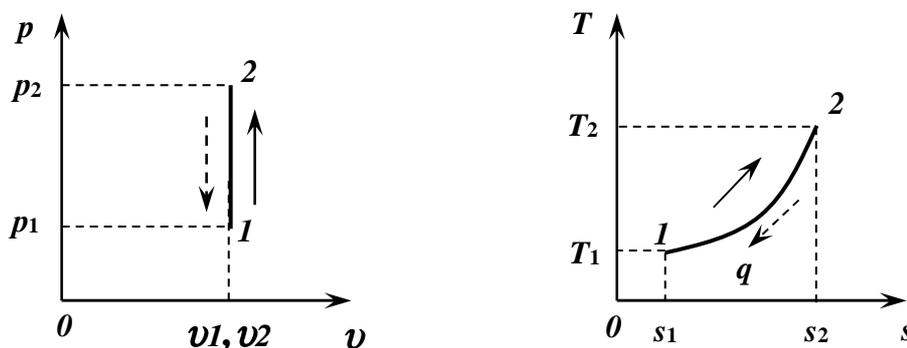


Рис. 3.1.

В изохорном процессе вся подведенная теплота расходуется на изменение внутренней энергии системы

$$dq_v = dU$$
$$q_v = C_v \cdot (T_2 - T_1).$$

Изобарный процесс – процесс, происходящий при постоянном давлении, который описывается законом Гей-Люссака.

При изобарном процессе изменение объема прямо пропорционально изменению абсолютной температуры.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Изобарный процесс можно графически изобразить на $p\nu$ и Ts диаграммах следующим образом (рис.3.2).

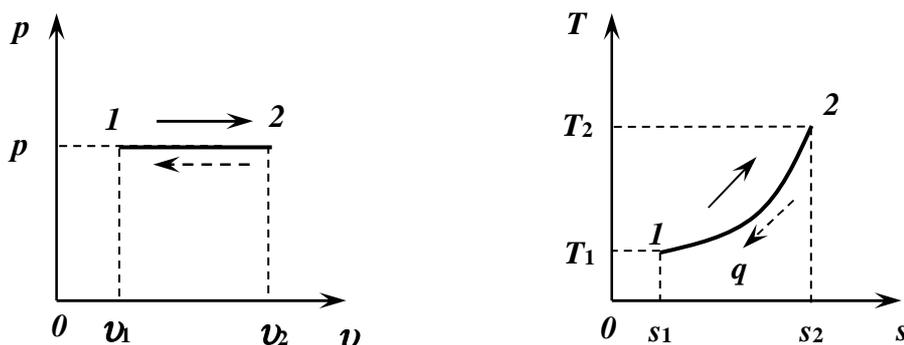


Рис. 3.2.

В изобарном процессе подведенная теплота расходуется на изменение энтальпии системы.

$$dq_p = di$$

$$q_p = C_p \cdot (T_2 - T_1).$$

Изотермический процесс – процесс, происходящий при постоянной температуре, который описывается законом Бойля-Мариотта.

При постоянной температуре изменение давления газа обратно пропорционально изменению объема.

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

Изотермический процесс можно графически изобразить на $p\nu$ и Ts диаграммах следующим образом (рис.3.3).

В изотермическом процессе подведенная теплота расходуется на совершение внешней работы.

$$dq_T = pdv$$

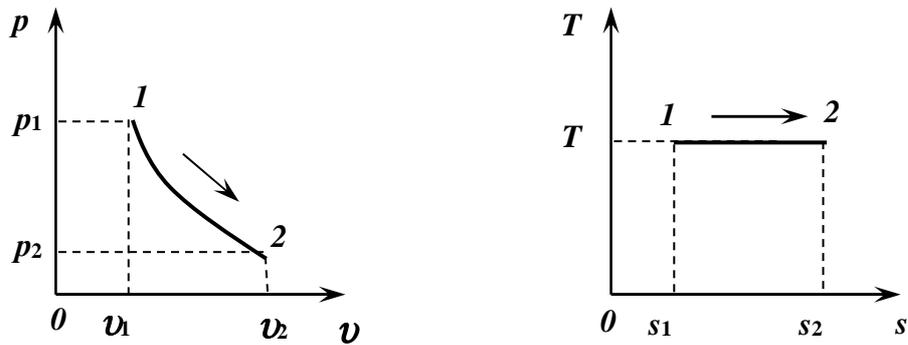


Рис. 3.3.

Адиабатный процесс – процесс, происходящий без теплообмена с внешней средой.

В отличие от только, что рассмотренных трех процессов, в адиабатном процессе все три параметра, входящие в уравнение Клайперона (p , v , T), переменны.

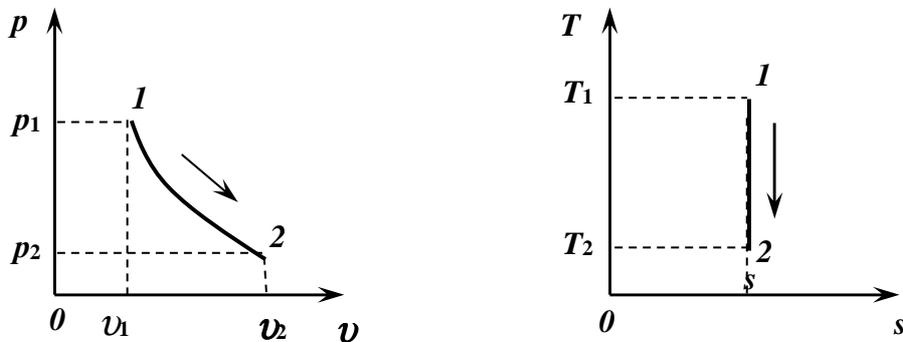


Рис. 3.4.

Адиабатный процесс можно графически изобразить на $p v$ и $T s$ диаграммах следующим образом (рис.3.4).

Адиабатный процесс описывается уравнением

$$P v^k = const,$$

где k – показатель адиабаты, который определяется отношением теплоемкостей.

$$k = C_p / C_v$$

Значения показателя адиабаты зависят от атомности газа:

для одноатомных газов $k = 1,66$;

для двухатомных газов $k = 1,40$;

для трех- и более атомных газов $k = 1,33$.

Основные параметры системы в адиабатном процессе связаны следующим образом:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^k \qquad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} \qquad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Политропный процесс – процесс, при котором теплоемкость системы сохраняется постоянной.

Уравнение политропы имеет вид

$$p v^n = const,$$

где n – постоянная для данного процесса величина, называемая показателем политропы.

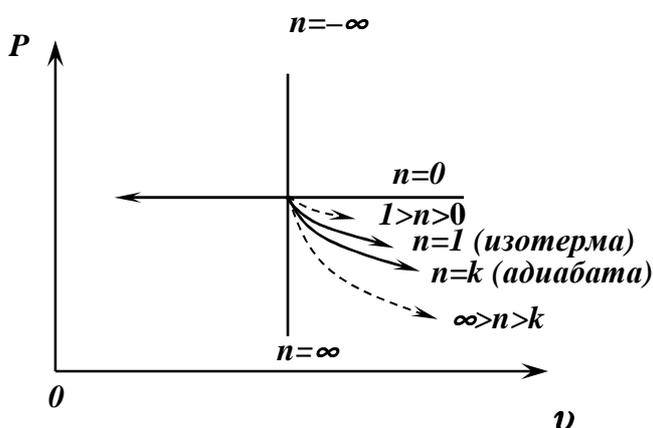


Рис. 3.5.

Изменяя значения показателя политропы, можно получить кривые, характеризующие ранее рассмотренные случаи изменения состояния газа (рис.3.5). Так, при $n=0$, политропный процесс становится изобарным; при $n=\infty$ – изохорным; при $n=1$ – изотермическим, а при $n=k$ – адиабатным.

3. ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Установка представляет собой (рис.3.6) стеклянный сосуд 1, который через кран 2 сообщается с атмосферой, а через кран 3 – с компрессором 4. Давление сжатого воздуха в сосуде измеряется манометром 5.

4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

1. Подготовить таблицу.
2. Убедившись, что кран 2 закрыт, а компрессор сообщается с сосудом через кран 3, накачать небольшое количество воздуха до избыточного давления, порядка 200...400 мм водяного столба. После чего кран 3 закрыть. При этом температура воздуха в сосуде несколько повысится, поэтому необходимо 5...7 минут подождать, чтобы температура приняла первоначальное значение комнатной температуры T_1 (первое положение системы).

3. Записать в таблицу показания манометра, т.е. разность уровней водяного столба h_1 в U – образной трубке.
4. Открыть кран 2 на 2...3 сек. При этом воздух расширяется адиабатно и давление в сосуде p_1 упадет до атмосферного. Это будет видно по показанию манометра. Естественно, температура воздуха в сосуде несколько понизится, до температуры T_2 (второе положение системы).
5. Через 5...7 минут воздух в сосуде нагреется до T_3 , т.е. до комнатной температуры и его давление увеличится до p_3 , что определяем по показанию манометра, т.е. по разности уровней водяного столба h_3 (третье положение системы).
6. Весь опыт повторить 3 раза, меняя величину разности уровня жидкости в манометре h_1 .

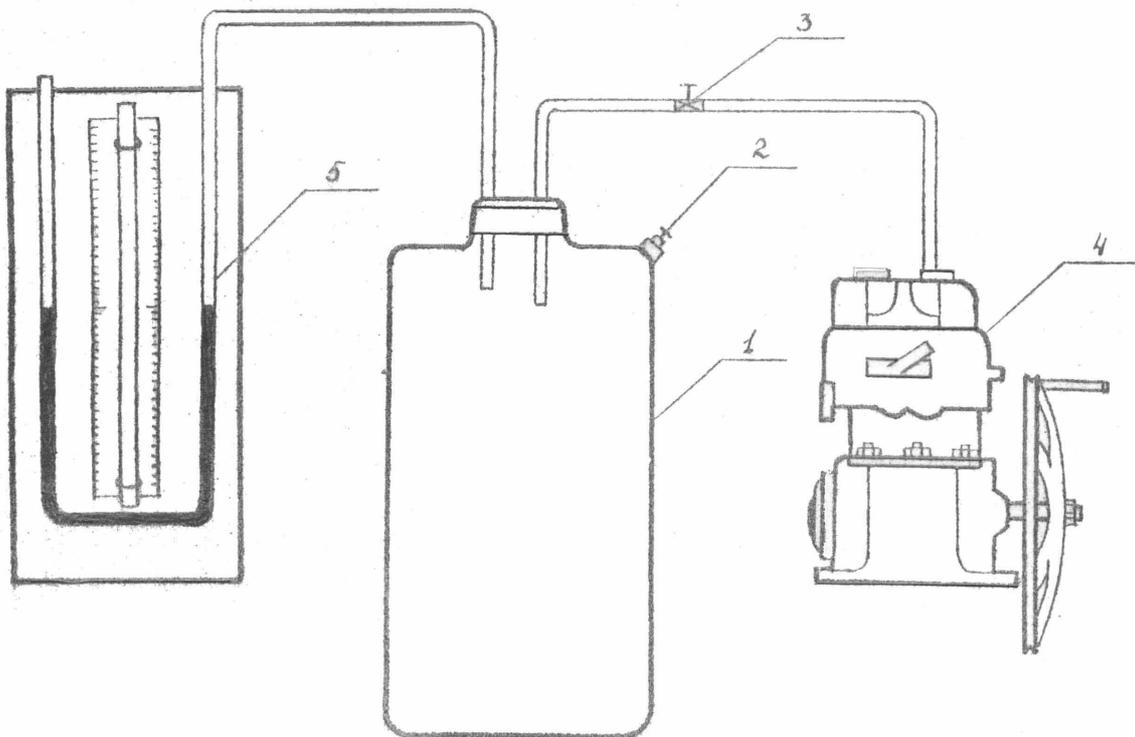


Рис. 3.6.

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА

Объектом исследования является лишь часть сжатого воздуха в сосуде, а именно, та часть, которая при давлении p_1 занимает объем v_1 , а при атмосферном давлении займет объем сосуда v_2 .

Процесс, происходящий при открытии крана 2 на 2...3 сек, можно считать адиабатным расширением. Процессом теплообмена можно пренебречь ($dq=0$), поэтому справедливо следующее равенство адиабатного процесса:

$$p_1 \cdot v_1^k = p_a \cdot v_2^k$$

где p_1 – давление воздуха в сосуде до расширения; v_1 – удельный объем воздуха в сосуде; p_a – атмосферное давление; v_2 – удельный объем воздуха после расширения.

Прологарифмировав это равенство, определим показатель адиабаты k :

$$k = \frac{\ln(p_1 / p_a)}{\ln(v_2 / v_1)}$$

В этом уравнении v_2/v_1 является неизвестной, и для определения этого соотношения рассмотрим изохорный процесс согласно п.5 «Порядка проведения опыта» (линия 2–3 рис.3.7).

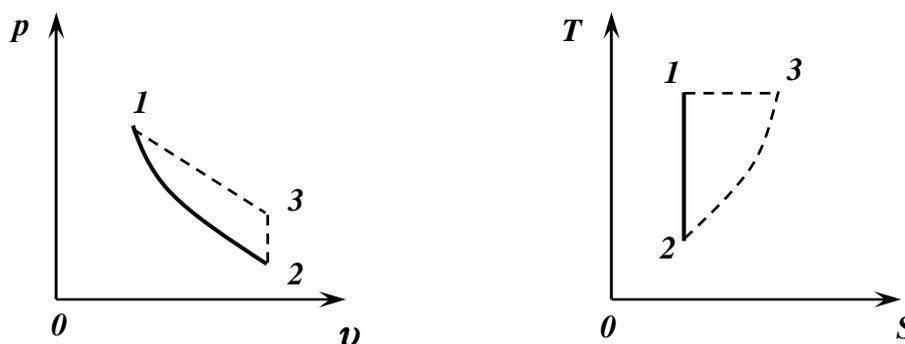


Рис. 3.7.

Так как $T_3=T_1$ и $v_3=v_2$, можем написать

$$\frac{v_3}{v_1} = \frac{p_1}{p_3}$$

Следовательно, показатель адиабаты определяется:

$$k = \frac{\ln(p_1 / p_a)}{\ln(p_1 / p_3)}$$

Значения p_1 и p_3 определяются по уровню водяного столба, соответственно в первом и третьем положениях системы.

$$\begin{aligned} p_1 &= p_a + \gamma h_1 \\ p_3 &= p_a + \gamma h_3, \end{aligned}$$

где p_a – атмосферное давление;

γ – удельный вес жидкости (воды в манометре);

h_1 и h_3 – разности уровней жидкости в манометре.

Подставляя значения p_1 и p_3 в последнее уравнение показателя адиабаты, получим:

$$k = \frac{\ln \frac{p_a + \gamma \cdot h_1}{p_a}}{\ln \frac{p_a + \gamma \cdot h_1}{p_a + \gamma \cdot h_3}}$$

После ряда преобразований и с некоторыми допущениями получим окончательное выражение для определения k .

$$k \approx \frac{h_1}{h_1 - h_3}$$

Вычислим значения k для каждого опыта, затем определим среднее значение k по трем опытам и вычислим относительную погрешность показателя адиабаты по формуле:

$$\sigma = \left| \frac{k_T - k}{k} \right| \cdot 100\%$$

где $k_T=1,4$.

Таблица 3.1.

№№	1 состояние	3 состояние	k
1.			
2.			
3.			

6. ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ

Отчет по выполненной работе должен содержать следующее:

1. Краткое описание работы.
2. Принципиальная схема установки.
3. Порядок выполнения опыта.
4. Обработка результатов опыта.
5. Таблица результатов опыта.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятие о термодинамических процессах.
2. Законы Бойля-Мариотта, Гей-Люссака и Шарля.
3. Зависимость показателя адиабаты от атомности газа.

8. ЛИТЕРАТУРА

1. Теплотехника. Учебник для ВУЗов (В.Н. Луканин, М.Г.Шатров,

- Г.М.Камфер. – М.: Высшая школа, 1999 г.
2. Теплотехника. Под ред. В.Н.Крутова. – М.: Высшая школа, 1986 г.
3. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высшая школа, 1980 г.

Лабораторная работа № 4

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОБАРНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА»

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является закрепление знаний студентов о теплоемкости, ознакомить с экспериментальной установкой и методикой определения изобарной теплоемкости воздуха.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Известно, что у различных веществ способность воспринимать и отдавать теплоту не одинакова и эта характеристика определяется теплоемкостью этих веществ.

ТЕПЛОЕМКОСТЬЮ называется количество теплоты, которое необходимо подвести к телу, чтобы нагреть его на один градус.

Различают теплоемкость среднюю и истинную.

Теплоемкость тела в интервале температур T_1-T_2 называется средней теплоемкостью.

$$C_m = \frac{\Delta Q}{T_2 - T_1}$$

Если к телу подводится бесконечно малое количество теплоты dQ и температура тела T при этом повысится на величину dT , то отношение

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

определяет истинную теплоемкость тела при температуре T .

Для возможности сравнения теплоемкостей различных веществ между собой и для технических расчетов ввели понятие удельной теплоемкости.

УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТЬЮ называют количество теплоты, необходимое для изменения температуры единицы количества вещества на один градус.

В зависимости от выбранных единиц различают теплоемкости:

1. Удельную массовую:

$$C = \frac{1}{m} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta T},$$

отнесенную к 1 кг массы вещества и измеряемую в Дж/(кг·град);

2. Удельную объемную:

$$C' = \frac{1}{v} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta T},$$

отнесенную к 1 м³ вещества и измеряемую в Дж/(м³·град);

3. Удельную мольную:

$$C_{\mu} = \frac{\mu}{m} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta T},$$

отнесенную к 1 моль и измеряемую в Дж/(моль·град);

У газообразных тел, в отличие от тел жидких и твердых, теплоемкость в значительной степени зависит от внешних условий, при которых к телу подводят или отводят теплоту.

В теплотехнике большое значение имеют процессы, совершающиеся при постоянном объеме ($v=const$) и при постоянном давлении ($p=const$). В первом случае теплоемкость называют изохорной и обозначают C_v , а во втором – изобарной и обозначают C_p .

При изохорном подогреве газа его объем не увеличивается. Следовательно, он не совершает работы против внешних сил. При изобарном подогреве газ, расширяясь, преодолевает внешнюю силу, действующую на поршень, т.е. совершает работу.

Следовательно, при нагревании одного и того же газа до одинаковой температуры в одинаковых условиях при изобарном процессе надо затратить больше теплоты, чем при изохорном:

$$C_p - C_v = R.$$

3. ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Схема опытной установки приведена на рис.4.1.

Измерение теплоемкости воздуха производится в проточном стеклянном калориметре 1. Для уменьшения тепловых потерь в окружающую среду калориметр окружен стеклянной оболочкой 2. Воздух между калориметром и оболочкой удален. В калориметре помещен электрический нагреватель 3, при помощи которого к исследуемому воздуху подводится теплота. Питание электронагревателя осуществляется от электрической сети (220 В) через автотрансформатор 4, позволяющий регулировать мощность нагревателя. Измерение силы тока и напряжения в цепи производится амперметром 5 и вольтметром 6.

Постоянный расход воздуха через калориметр создается компрессором 7. Расход воздуха измеряется расходомером 8 с постоянной диафрагмой, с максимальной шкалой измерения 6 л/мин. Измерение расхода воздуха осуществляется с помощью автотрансформатора 9. Температура воздуха на входе в калориметр (t_1) и на выходе (t_2) измеряется термометрами 10, 11.

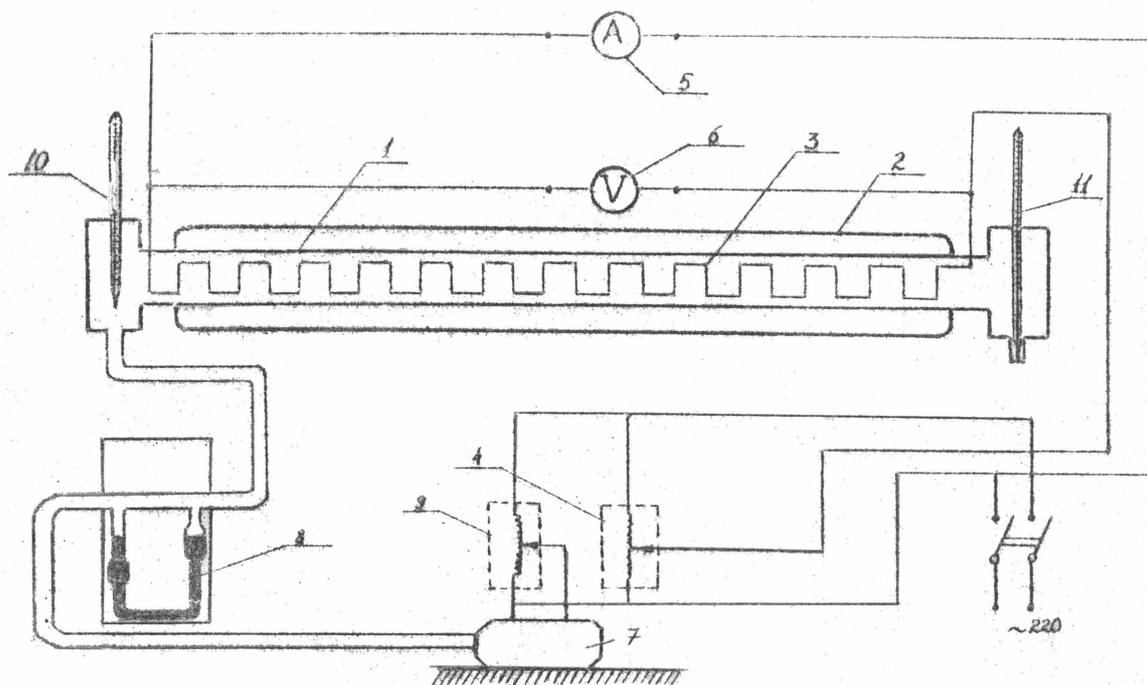


Рис. 4.1.

4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

1. Подготовить таблицу испытания.
2. Ознакомиться со схемой опытной установки.
3. Включить установку в сеть.
4. Включить компрессор и установить определенный расход воздуха через калориметр, определяемый по показанию газового расходомера.
5. Убедиться, что температура входящего в калориметр воздуха равна температуре входящего воздуха.
6. Определить температуру входящего в калориметр воздуха. Результат измерения записать в таблицу.
7. Включить электронагреватель и установить определенную мощность, потребляемую электронагревателем.
8. Показания амперметра и вольтметра занести в таблицу.
9. Измерить атмосферное давление воздуха барометром и записать значение p_t в таблицу.
10. Через 10 минут после начала опыта измерить температуру на выходе у калориметра. Результаты измерения занести в таблицу.

11. Повторить опыт для трех различных значений, потребляемой электронагревателем мощности.
12. Отключить установку от сети.

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА

1. Из-за незначительности тепловых потерь можно принять, что вся энергия электронагревателя идет на нагрев воздуха. Тогда количество теплоты, воспринимаемое воздухом в единицу времени, определяется по формуле:

$$Q = I \cdot U, \text{ Вт}$$

2. Определяем объемный расход воздуха в секунду, приведенный к нормальным условиям:

$$v_0 = \frac{p_t \cdot v_t \cdot T_0}{p_0 \cdot T_t}$$

3. Определяем среднюю объемную изобарную теплоемкость воздуха:

$$C'_{Pm} = \frac{Q}{v_0 \cdot (t_2 - t_1)}$$

4. Определяем среднюю массовую теплоемкость воздуха:

$$C_{Pm} = \frac{C'_{Pm} \cdot 22,4}{\mu},$$

где Q – количество теплоты, полученное воздухом в сек;

v_0 – объемный расход воздуха, $\text{м}^3/\text{сек}$, приведенный к нормальным условиям ($T_0 = 273,15 \text{ К}$ и $p_0 = 101325 \text{ Па}$);

t_1, t_2 – температура воздуха до и после нагревателя, $^{\circ}\text{С}$;

p_t – атмосферное давление воздуха во время опыта, Па ;

T_t – температура воздуха в лаборатории, К ;

v_t – объемный расход воздуха через калориметр, $\text{м}^3/\text{сек}$;

$22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ – объем одного кмоль воздуха при нормальных условиях;

μ – масса кмоль воздуха, $\mu = 29 \text{ кг/кмоль}$.

5. Определяем относительную ошибку опыта:

$$\sigma_{C'_{Pm}} = \left| \frac{C'_{Pm} - C'_{Pm\text{табл}}}{C'_{Pm\text{табл}}} \right| \cdot 100\%$$

$$\sigma_{C_{pm}} = \left| \frac{C_{pm} - C_{pm\text{табл}}}{C_{pm\text{табл}}} \right| \cdot 100\%$$

6. ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ

Отчет по выполненной работе должен содержать следующее:

1. Краткое описание работы.
2. Принципиальную схему установки.
3. Обработку результатов опыта.
4. Таблицу испытания.

Таблица 4.1.

№	I, A	U, B	p, Pa	T, K	$v, m^3/сек$	$t_1, ^\circ C$	$t_2, ^\circ C$	$v_0, m^3/сек$
1								
2								
3								

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятие о теплоемкости.
2. Виды теплоемкостей.
3. Зависимость теплоемкости от процесса.

8. ЛИТЕРАТУРА

1. Теплотехника. Учебник для ВУЗов (В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер. – М.: Высшая школа, 1999 г.
2. Теплотехника. Под ред. В.Н. Крутова. – М.: Высшая школа, 1986 г.
3. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высшая школа, 1980 г.

Лабораторная работа №5

«ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СВОБОДНОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА»

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является закрепление знаний студентов по теории конвективного и радиационного (лучистого) теплообмена, определение опытным

путем конвективного (α_k) и радиационного (α_p) коэффициентов теплоотдачи, изучение зависимости коэффициентов теплоотдачи от температурного напора $\alpha=f(\Delta t)$.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Наука, изучающая закономерности процессов теплообмена между телами и распространения теплоты внутри одного тела, называется теплопередачей. Теплота передается тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Процесс распространения тепловой энергии при непосредственном соприкосновении отдельных частей тела, имеющих различные температуры, называется **ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ**.

Процесс переноса тепловой энергии при перемещении объема жидкости или газа в пространстве из области с одной температурой в область, имеющую другую температуру, называется **КОНВЕКЦИЕЙ**.

Процесс передачи тепловой энергии электромагнитными волнами называется **ИЗЛУЧЕНИЕМ**.

Тепловой поток при теплоотдаче определяется законом Ньютона-Рихмана, установленным опытным путем:

$$Q = \alpha \cdot F \cdot (T_c - T_{oc}), \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$;

F – площадь поверхности твердого тела;

T_c – температура поверхности твердого тела;

T_{oc} – температура окружающей жидкой или газообразной среды.

Разность температур $\Delta T = T_c - T_{oc}$ называют температурным напором. Из уравнения (1) можно получить выражение, определяющее коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Q}{F \cdot (T_c - T_{oc})} \quad (2)$$

Таким образом, коэффициент теплоотдачи характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью твердого тела и окружающей средой (жидкой или газообразной) и численно равен количеству теплоты, отдаваемой (или воспринимаемой) единицей поверхности в единицу времени при разности температур между поверхностью тела и окружающей средой в один градус.

Общий тепловой поток от поверхности нагретого тела складывается из двух видов тепловых потоков:

$$Q = Q_k + Q_p, \quad (3)$$

где Q_k – конвективный тепловой поток;

Q_p – радиационный тепловой поток.

Каждый из потоков характеризуется своим коэффициентом теплоотдачи, определяемым согласно уравнению (2). Тогда уравнение (3) можно записать в виде:

$$\alpha \cdot F \cdot (T_c - T_{oc}) = \alpha_k \cdot F \cdot (T_c - T_{oc}) + \alpha_p \cdot F \cdot (T_c - T_{oc}) \quad (4)$$

откуда:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_p \quad (5)$$

Величина коэффициента теплоотдачи зависит от большого количества факторов:

$$\alpha = f(\omega, \lambda, \mu, \rho, C, X, T_{oc}, T_c, \Delta T, \Phi, l_1, l_2, l_3 \dots), \quad (6)$$

где ω – скорость движения окружающей среды;

λ – коэффициент теплопроводности окружающей среды;

μ – коэффициент динамической вязкости среды;

ρ – плотность среды;

C – теплоемкость среды;

X – характер движения среды (свободное или вынужденное);

T_{oc}, T_c – температура окружающей среды, температура твердого тела;

ΔT – температурный напор;

Φ – форма твердого тела;

l_1, l_2, l_3 – размеры поверхности твердого тела.

Уравнение (6) показывает, что коэффициент теплоотдачи является функцией многих переменных, поэтому для его определения невозможно дать общую формулу. Обычно α определяют опытным путем.

Свободное движение, называемое иначе естественной конвекцией, называется подъемной силой, обусловленной разностью плотностей холодных и нагретых частиц жидкости (газа). Такое движение всегда возникает вокруг тела, если его температура отличается от температуры окружающей среды. Например, в помещении находится нагретая труба. Воздух, соприкасаясь с трубой, нагревается и его плотность уменьшается. Нагретые частицы переносят воспринятую теплоту в окружающее пространство. Количество перенесенной теплоты будет тем больше, чем больше скорость движения воздуха, которая зависит от разности температур (Δt).

3. ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Схема установки приведена на рис.5.1.

Установка состоит из стальной трубы (1) диаметром $d = 58 \text{ мм}$ и длиной $l = 800 \text{ мм}$. Труба расположена на специальном штативе. Внутри трубы вдоль ее оси расположен электронагреватель (2), в цепи которого включены: амперметр (3), вольтметр (4) и ЛАТР (5). Тепловая энергия по длине трубы выделяется равномерно. Количество теплоты, выделенное электронагревателем и переданное через стенку трубы в окружающую среду при установившемся тепловом состоянии, определяется по затраченной электрической мощности. Потребляемая электронагревателем мощность регулируется ЛАТРОм и определяется по показаниям амперметра и вольтметра.

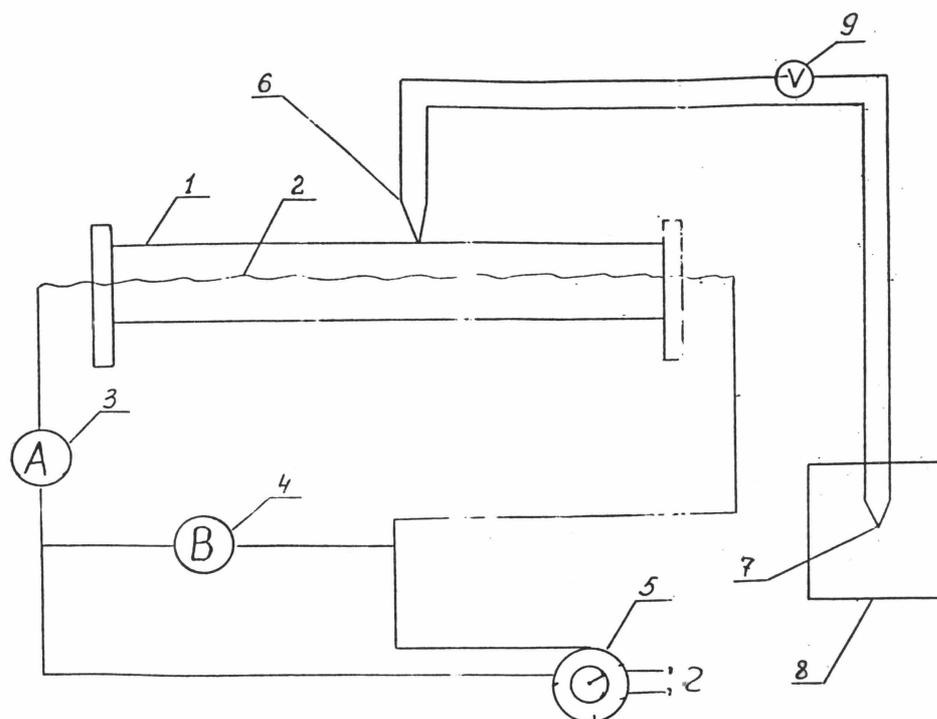


Рис. 5.1.

Температура поверхности трубы определяется при помощи шести термопар, горячие спаи которых (6) равномерно расположены на поверхности трубы. Истинное значение температуры определяется как среднеарифметическое из показаний всех термопар. Холодные спаи термопар (7) объединены и помещены в сосуд (8) с тающим льдом (при температуре 0°C). Для измерения термоэлектродвижущей силы термопар применяется милливольтметр (9), к которому последовательно подключаются все шесть термопар. Градуировочный график помещен на стенде. Температура окружающей среды измеряется жидкостно-стеклянным термометром.

4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

1. Подготовить таблицу испытания (табл. 5.1).
2. Ознакомиться со схемой опытной установки.
3. Заполнить сосуд водой со льдом.
4. Убедиться, что стрелка ЛАТРа стоит на нуле.

5. Включить установку в электрическую цепь.
6. При помощи ЛАТРа установить определенную силу тока. Показания амперметра и вольтметра внести в табл. 5.1.
7. Через 12-15 минут, после установления стационарного теплового режима, приступить к измерению температуры поверхности трубы. Для этого последовательно подключать каждую термопару к милливольтметру. Показания прибора занести в таблицу.
8. Произвести измерение температуры окружающей среды при помощи жидкостного стеклянного термометра и занести показания в таблицу.
9. Повторить опыт еще два раза, изменяя силу потребляемого электронагревателем тока. Запись показаний приборов производить при установившемся тепловом режиме.
10. Отключить установку от сети.

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА:

1. При установившемся тепловом режиме вся выделяющаяся в электронагревателе тепловая энергия передается через поверхность трубы в окружающую среду. При этом тепловой поток от поверхности трубы к воздуху определится согласно первому закону термодинамики по формуле:

$$Q = I \cdot U, \quad (7)$$

2. Коэффициент радиационно-конвективной теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Q}{F \cdot (T_c - T_{oc})}, \quad (8)$$

где $F = \pi \cdot d \cdot l$ – площадь поверхности трубы, m^2 ;

T_c – температура поверхности трубы, определяемая при помощи тарировочного графика термопары по среднему значению ТЭДС.

3. Тепловой поток, отданный путем радиации:

$$Q_p = \varepsilon_{np} \cdot C_0 \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{oc}}{100} \right)^4 \right] \quad (9)$$

где $\varepsilon_{np} = 0,8$ – приведенная степень черноты поверхности трубы;

$C_0 = 5,77 \left[\frac{Вт}{m^2 (K)^4} \right]$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

T_c, T_{oc} – соответственно абсолютные температуры поверхности трубы и воздуха (K).

4. Коэффициент радиационной теплоотдачи:

$$\alpha_p = \frac{Q_p}{F \cdot (T_c - T_{oc})} \quad (10)$$

5. Тепловой поток, отданный путем конвективной теплоотдачи:

$$Q_k = Q - Q_p \quad (11)$$

6. Коэффициент конвективной теплоотдачи:

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{F \cdot (T_c - T_{oc})} \quad (12)$$

7. Результаты расчета занести в табл. 5.2.

6. ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ

Отчет по выполненной работе должен содержать следующее:

1. Краткое описание работы.
2. Принципиальную схему установки.
3. Таблицу испытаний (табл. 5.1).
4. Обработку результатов опыта (привести все расчеты).
5. Таблицу результатов испытаний (табл. 5.2).
6. Графики зависимости коэффициентов теплоотдачи от температурного напора.

Таблица 5.1.

№	I, A	U, B	ТЭДС термопар, мВ						Среднее значение ТЭДС, мВ	T _{oc} , K	T _c , K
			1	2	3	4	5	6			
1.											
2.											
3.											

Таблица 5.2.

№	ΔT, K	Q, Вт	Q _p , Вт	Q _k , Вт	α (Вт/м ² ·К)	α _p (Вт/м ² ·К)	α _k (Вт/м ² ·К)
1.							
2.							
3.							

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Три основных способа переноса теплоты.
2. Закон Ньютона-Рихмана.
3. Физический смысл коэффициента теплоотдачи.
4. Факторы, влияющие на коэффициент теплоотдачи.

8. ЛИТЕРАТУРА

1. Теплотехника. Учебник для ВУЗов (В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер. – М.: Высшая школа, 1999 г.
2. Теплотехника. Под ред. В.Н. Крутова. – М.: Высшая школа, 1986 г.
3. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высшая школа, 1980 г.

Лабораторная работа № 6

«ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА В ТРУБЕ»

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является экспериментальное определение локальных и средних значений коэффициента теплоотдачи при вынужденном движении воздуха в трубе, определение участка стабилизации и влияния скорости воздуха на коэффициент теплоотдачи.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Конвективный теплообмен, возникающий под действием внешних сил, называется ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИЕЙ .
--

Вынужденное движение рабочего тела, осуществляемое при помощи насосов, вентиляторов, компрессоров является одним из самых распространенных в технике. Интенсивность при этом зависит от режима движения среды, физических свойств движущего газа или жидкости, а также от геометрических размеров тела, отдающего или принимающего тепло.

Согласно законам гидродинамики, движение в этом случае может быть ламинарным ($Re = \omega d / \nu < 2300$), или турбулентным (стабильный турбулентный режим возникает при $Re > 10^4$).

При $Re < 2300$ интенсивность теплоотдачи невелика, не зависит от скорости движения в жидкости и зависит от теплофизических свойств жидкости.

При турбулентном режиме течения возникает интенсивный теплообмен между различными слоями перемешивающейся жидкости.

При вынужденном течении жидкости в трубе только на достаточном удалении от входа устанавливается стабилизированное течение. В этой области теплоотдача зависит от скорости, диаметра трубы и теплофизических свойств жидкости. На участке нестабилизированного течения коэффициент теплоотдачи резко изменяется по длине.

Математическое описание процесса теплообмена складывается из системы дифференциальных уравнений и условий однозначности. Однако, во многих случаях аналитическое решение этих уравнений не представляется возможным. В этом случае вводят, так называемые, критерии подобия, которые отражают совместное влияние совокупности физических величин на явление. Использование критериев подобия позволяет: сократить число аргументов задачи и упростить обработку результатов вычисления, обобщить данные эксперимента, моделировать процессы.

Так, например, при турбулентном движении жидкостей и газов ($Re > 10^4$) внутри гладких труб на участке стабилизированного течения теплоотдача описывается опытной формулой:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}, \quad (1)$$

Для воздуха ($Pr \approx 0,7$) эта формула упрощается

$$Nu = 0,018 \cdot Re^{0,8} \quad (2)$$

где $Nu = \alpha l / \lambda$ – критерий Нуссельта;

$Re = \omega d / \nu$ – критерий Рейнольдса;

$Pr = \nu / a$ – критерий Прандтля;

α – коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$;

l – длина, м;

λ – коэффициент теплопроводности, $Вт/(м \cdot К)$;

ω – скорость движения, м/с;

d – диаметр, м;

ν – коэффициент кинематической вязкости, $м^2/с$;

a – коэффициент температуропроводности, $м^2/с$.

В данном случае критерий Нуссельта является неопределяющим критерием, т.к. содержит искомый коэффициент теплоотдачи.

Критерии Рейнольдса и Прандтля являются определяющими критериями, т.к. состоят из физических величин, заданных условиями однозначности.

3. ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Рабочий участок установки (рис.6.2) представляет собой трубку ($l=0,73$ м, $d=0,09$ м) из нержавеющей стали. Один конец трубки связан с атмосферой, другой с центробежным вентилятором.

Фторопластовые опоры тепло- и электроизолируют трубку. К трубке подводится электрический ток низкого напряжения для нагревания рабочего участка. Электрическое сопротивление трубки – 0,03440 Ом.

Напряжение в цепи регулируется ЛАТРОм – 15 (рис.6.3) и регистрируется цифровым комбинированным прибором – 8 (рис.6.1). Температура стенки трубки измеряется десятью термопарами ТХК 1-10 (рис.6.3). Координаты горячих спаев термопар, отсчитываемые от входа, приведены в таблице 1.

Температура воздуха на входе и выходе из трубки измеряется термопарами 11 и 12. Перед термопарой 11 установлена сетка для перемешивания воздуха. Термо-ЭДС термопар измеряется милливольтметром 18 с автоматической компенсацией температуры холодных спаев.

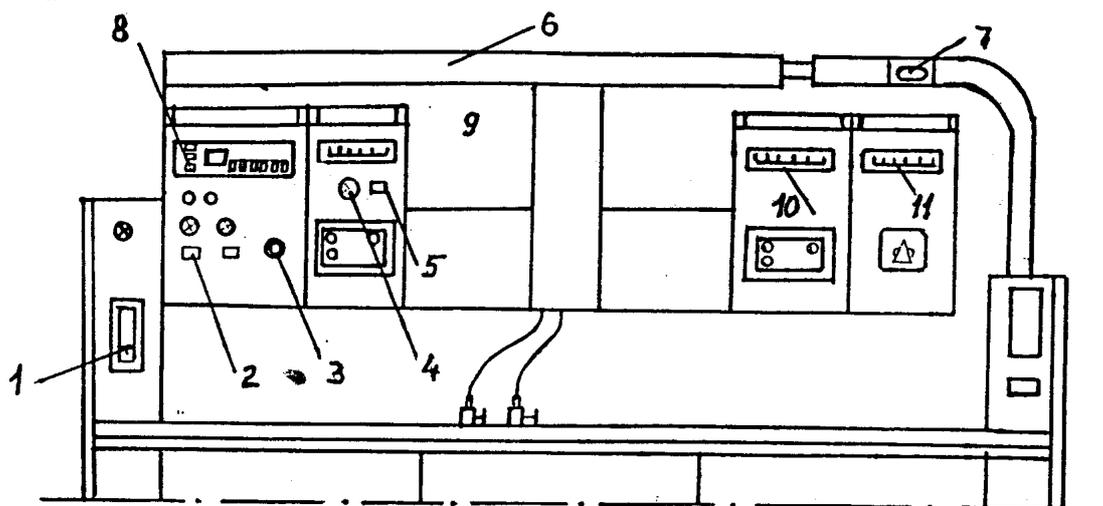


Рис. 6.1. Общий вид установки.

Таблица 6.1.

Номер термопары	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Координата X_i	25	45	85	155	250	370	130	610	695	715
Длина участка трубы L_i	25	30	55	82	107,5	115	120	107,5	55	17,5

Скорость движения воздуха измеряется трубкой Пито – 14 (рис.6.3) в комплекте с дифманометром и миллиамперметром. С помощью второго дифманометра и миллиамперметра измеряется падение давления на рабочем участке.

Регулирование скорости воздуха осуществляется изменением частоты вращения ротора электродвигателя вентилятора 13 (рис.6.3) регулятором напряжения 4 (рис.6.1).

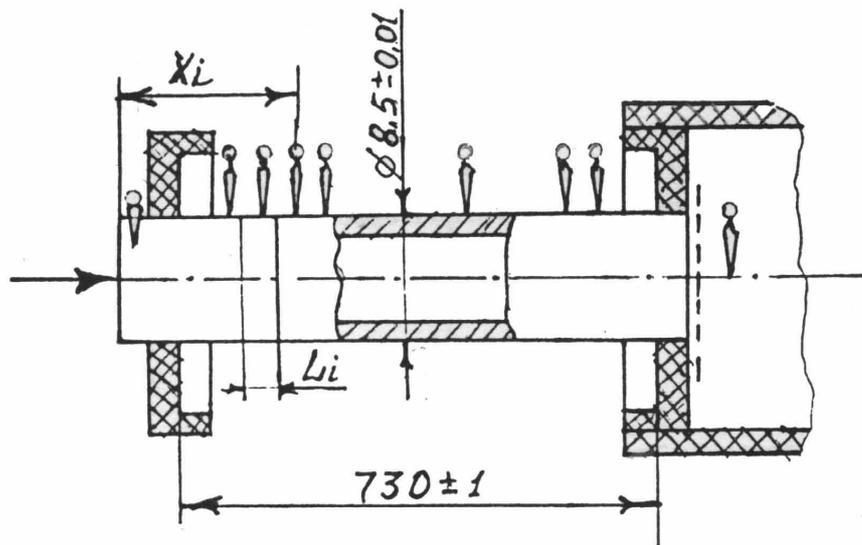


Рис. 6.2. Рабочий участок установки.

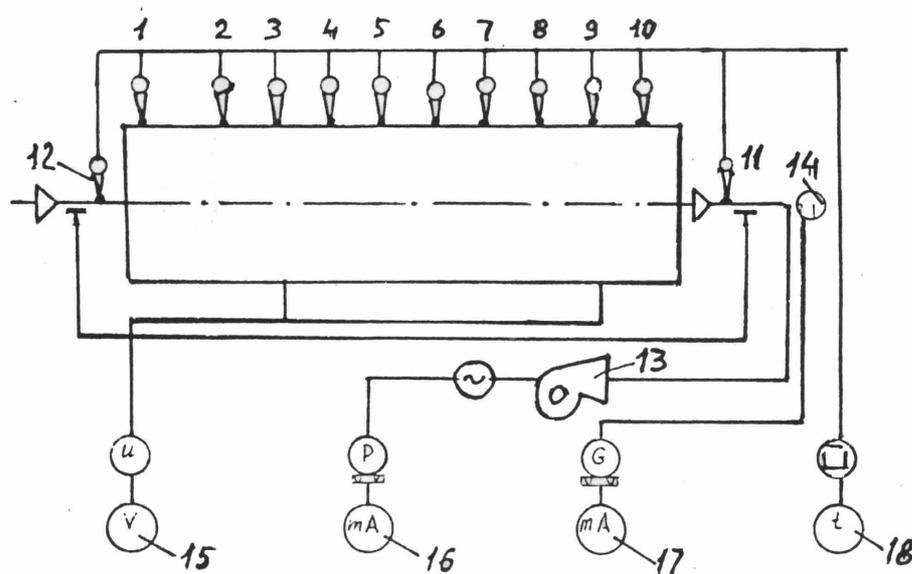


Рис. 6.3. Схема измерений.

4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

1. Включить установку в сеть.
2. Включить центробежный вентилятор и с помощью регулятора вращения электродвигателя и заслонки установить минимальный перепад давления ($\Delta p = 71 \text{ мм.вод.ст.} = 700 \text{ Па}$) по миллиамперметру.
3. Включить цепь нагревания рабочего участка и установить падение напряжения $1,5 \text{ В}$ по вольтметру.
4. Убедившись в стабильности показаний термопар во времени, т.е. наступлении стационарного теплового режима замерить показания всех термопар, расположенных на трубке.

5. Измерить динамический напор, показываемый трубкой Пито.
6. Измерить падение давления Δh по длине трубки.
7. Измерить напряжение, подаваемое на трубку.
8. Измерить температуру ($t_{окр}$) и давление окружающей среды (B).
9. Результаты измерений занести в таблицу испытаний.
10. Повторить измерения на расходах воздуха, соответствующих динамическому напору 100 и 200 мм.вод.ст.
11. После окончания опытов сбросить напряжение. Выключить цепь нагревания трубки.
12. Дождавшись охлаждения трубки до комнатной температуры, выключить центробежный вентилятор.

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА

1. Определить тепловой поток Q , Вт:

$$Q = \frac{U^2}{R}, \quad (3)$$

где $R \approx 0,0344 \text{ Ом}$ – электрическое сопротивление рабочего участка.

2. Определить массовый расход воздуха по показаниям трубки Пито:

$$M = \varepsilon \cdot F \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p} \quad (4)$$

где Δp – динамический напор, Па;

$$\rho = \frac{p}{R \cdot (t_{11} + 273)} \text{ – плотность воздуха, кг/м}^3;$$

$p = B - \Delta h$ – абсолютное давление воздуха в измерительном сечении, Па;
 B – барометрическое давление, Па;

Δh – падение давления на рабочем участке, Па;

$R = 287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ – газовая постоянная воздуха;

$\varepsilon = 0,96$ – коэффициент расходомерного устройства;

F – площадь сечения трубки ($d_{\text{внутр.трубки}} = 0,085 \text{ м}$).

3. Определить среднюю температуру воздуха:

$$t_g = 0,5 \cdot (t_{11} + t_{12}), \quad (5)$$

4. Определить среднюю плотность воздуха:

$$\rho_g = \frac{B}{R \cdot (t_g + 273)} \quad (6)$$

5. Вычислить значения температурного напора в сечениях трубки с координатами X ($i = 1, 2, \dots, 10$)

$$\Delta t_i = (t_{cmi} - t_{11}) - \frac{(t_{12} - t_{11})}{730} \cdot X_i \quad (7)$$

где X_i – координаты горячих спаев термопар, m (табл. 6.1);
 $t_{11} = t_{окр}$ – температура окружающей среды, $^{\circ}C$.

6. Определить локальные значения коэффициентов теплоотдачи:

$$\alpha_i = \frac{Q - Q_n}{\Delta t_i \cdot \pi \cdot d \cdot l} \quad (8)$$

где $Q_n = k \cdot (t_{cm} - t_{11})$ – потери теплоты с наружной поверхности рабочего участка в окружающую среду за счет излучения, свободной конвекции и концевых потерь;

$k=0,18$ – коэффициент опытной установки;

$\bar{t}_{cm} = \sum_1^{10} \frac{t_{cmi}}{10}$ – средняя температура стенки, $^{\circ}C$.

7. Рассчитать среднее значение коэффициента теплоотдачи:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_2^9 \alpha_i \cdot L_i}{\sum_2^9 L_i} \quad (9)$$

Вследствие влияния утечек теплоты с торцов трубки α_1 и α_{10} – исключаются из рассмотрения.

8. По полученным значения α_i определить участок стабилизированного течения, где коэффициент теплоотдачи перестает зависеть от условий на входе в трубу.
9. Подсчитать значения коэффициента теплоотдачи на основном участке трубы по формуле (2), т.е.

$$\alpha = \frac{0,018 \cdot Re^{0,8} \cdot \lambda}{l} \quad (10)$$

где $Re = \alpha d / \nu = 4M / \pi \rho V d$

Теплофизические свойства воздуха приведены в табл. 6.3.

10. Сравнить коэффициенты теплоотдачи, полученные экспериментальным (9) и расчетным путями (10), т.е. рассчитать процент погрешности:

$$\sigma = \left| \frac{\bar{\alpha} - \alpha}{\alpha} \right| \cdot 100\% \quad (11)$$

Таблица 6.2.
Результаты испытаний

Δp		Δh		Показания термопар, $^{\circ}\text{C}$											
мм. вод. ст	Па	мм. вод. ст	Па	t_{cm1}	t_{cm2}	t_{cm3}	t_{cm4}	t_{cm5}	t_{cm6}	t_{cm7}	t_{cm8}	t_{cm9}	t_{cm10}	t_{cm11}	t_{cm12}
71															
120															
200															

Таблица 6.3.
Физические параметры сухого воздуха при нормальном давлении

$t, ^{\circ}\text{C}$	$C_p, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$\lambda, \text{Вт}/\text{м}\cdot\text{K}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
10	1,005	1,247	0,0251	20,06	14,16	0,705
20	1,005	1,205	0,0259	21,42	15,06	0,703
30	1,005	1,165	0,0267	22,54	16,00	0,701
40	1,005	1,128	0,0275	24,26	16,96	0,699
50	1,005	1,093	0,0282	26,72	17,95	0,698
60	1,005	1,060	0,0289	27,26	18,97	0,696

6. ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ

Отчет по выполненной работе должен содержать следующее:

1. Краткое описание работы.
2. Принципиальную схему установки.
3. Таблицу испытаний (табл. 6.2).
4. Обработку результатов опыта.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как вычислить по экспериментальным данным локальный и средний коэффициенты теплоотдачи?
2. Как определяется режим течения газа в трубе?
3. Как определяется скорость течения воздуха в трубе?
4. Какие критерии подобия входят в уравнение теплоотдачи для свободного и вынужденного движения воздуха?
5. Каков физический смысл критериев Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля?

8. ЛИТЕРАТУРА

1. Теплотехника. Учебник для ВУЗов (В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер. – М.: Высшая школа, 1999 г.
2. Теплотехника. Под ред. В.Н. Крутова. – М.: Высшая школа, 1986 г.
3. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высшая школа, 1980 г.

Лабораторная работа №7

«ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ»

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является закрепление знаний студентов о закономерностях распространения и передачи теплоты в телах. С помощью экспериментальной установки определить коэффициент теплопроводности твердых материалов, уяснить физический механизм процесса передачи теплоты.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Распространение теплоты в телах может происходить только в том случае, если в различных точках тела температура неодинакова.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ – процесс переноса теплоты вследствие непосредственного соприкосновения элементарных частиц тела, имеющих различную температуру.

В жидкостях, в твердых телах-диэлектриках перенос теплоты осуществляется путем непосредственной передачи теплового движения молекул и атомов соседним частицам вещества.

В металлах перенос теплоты осуществляется путем движения (диффузии) свободных электронов.

В основу теории теплопроводности положен закон Фурье. В дифференциальной форме он имеет вид:

$$dQ = -\lambda \cdot \frac{dt}{dn} \cdot dF \quad (1)$$

Тепловой поток dQ прямо пропорционален коэффициенту теплопроводности тела λ , градиенту температур dt/dn и площади изотермической поверхности dF .

ГРАДИЕНТ ТЕМПЕРАТУРЫ – вектор, численно равный производной от температуры по направлению нормали к изотермической поверхности.

Коэффициент теплопроводности показывает тепловой поток в *Ваттах*, который проходит через тело на площади изотермической поверхности 1 м^2 при расстоянии между изотермическими поверхностями 1 м и разности температур между ними в 1 градус .

Для каждого тела λ имеет свое численное значение и зависит от вида вещества, его пористости, влажности, температуры, давления и других параметров.

3. ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка состоит из термоблока и блока измерительного.

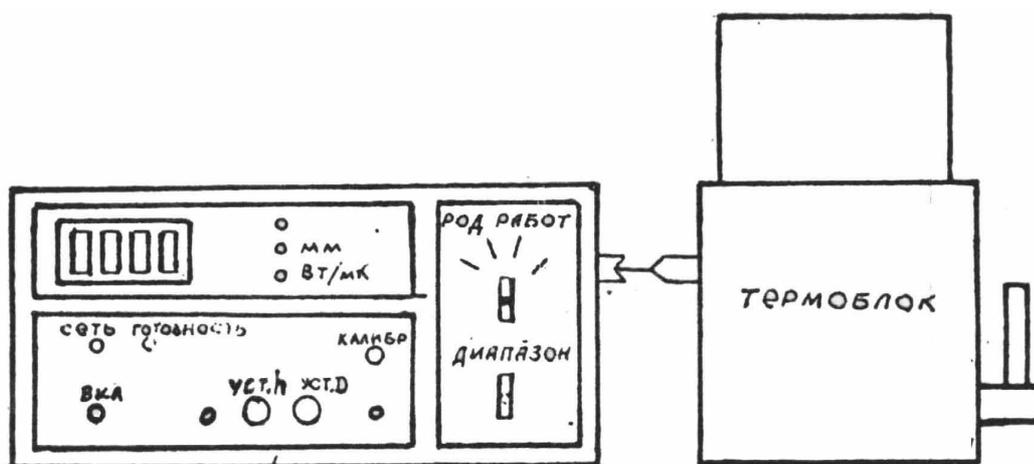


Рис. 7.1. Схема установки.

Термоблок (рис.7.1) состоит из блока измерительного верхнего БИВ (1, рис.2), блока измерительного нижнего – БИН (5, рис.7.2) и механизма подъема. В БИН размещены тепломер (3, рис.7.2) и термопары. Испытуемый образец (2, рис.7.2) размещается между верхним и нижним блоками.

На лицевой панели блока измерительного установлены следующие тумблеры управления (рис.7.1):

1. Тумблер и индикатор включения сети;
2. Индикаторы «с 100», «мм», «Вт/м·К», «ГОТОВН.»;
3. Переключатели «ДИАПАЗОН», «Вт/м·К», «РОД РАБОТ» и кнопка «КАЛИБР К_T»;
4. Резисторы «УСТ. h», «УСТ. D»;
5. Цифровое табло.

В основу работы измерителя положен стационарный сравнительный метод измерения.

На рис.7.2 представлена тепловая модель метода измерения теплопроводности.

Образец, имеющий форму диска или цилиндра, и контактирующий с ними термометр, помещаются между двумя блоками 1 и 5 с одинаковой теплоемкостью. Верхний блок перегревается относительно нижнего на 5...10 К. После установления в исследуемом образце стационарного теплового режима измеряются температурные перепады на образце и термомере.

Расчет коэффициента теплопроводности производится по следующему соотношению:

$$\lambda = \frac{K_T \cdot \delta}{A} \cdot \frac{\Delta T_{ни}}{\Delta T_n} \quad (2),$$

где K_T – тепловая проводимость термомера, $Вт/(м \cdot К)$;

δ – высота образца, $м$;

A – площадь образца, $м^2$;

$\Delta T_{ни}$ – перепад температуры на термомере, $К$;

ΔT_n – перепад температуры на образце, $К$.

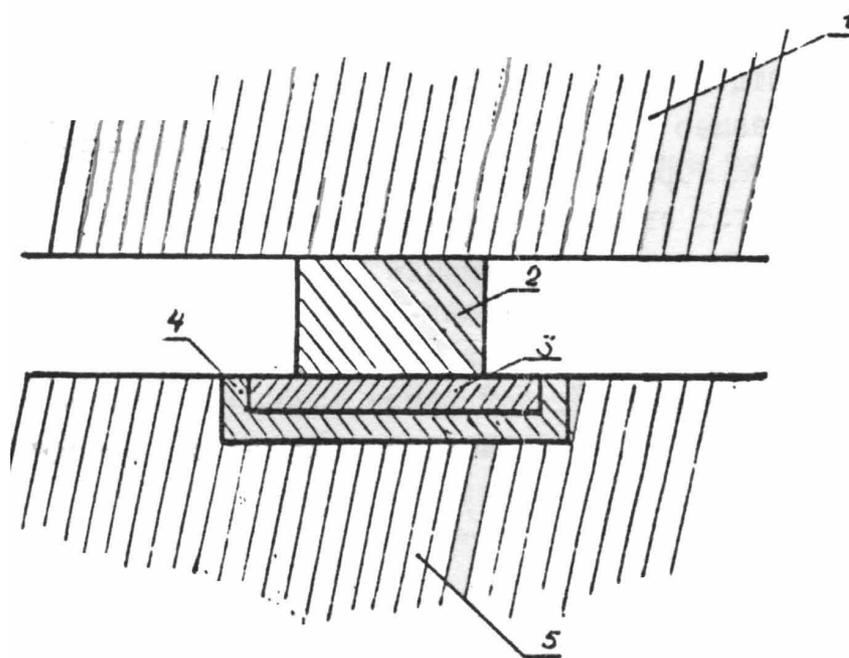


Рис. 7.2. Тепловая модель измерений.

4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

1. Поднять верхний блок ТБ.
2. Замерить высоту образца, изготовленного из оргстекла или сплава ВТ-6 с погрешностью не более 0,1 мм, диаметр с погрешностью не более 0,5 мм.
3. Установить образец строго по центру пластины термомера.

4. Перевести переключатель «РОД РАБОТ» в положение h и резистором «УСТ. h » ввести размер высоты образцовой меры по цифровому табло измерителя.
5. Перевести переключатель «РОД РАБОТ» в положение D и резистором «УСТ. D » ввести размер диаметра по цифровому табло измерителя.
6. Перевести переключатель «РОД РАБОТ» в положение λ и после того, как загорится световая индикация «ГОТОВН.», опустить верхний блок ТБ.
7. Полученное на цифровом табло значение коэффициента теплопроводности занести в табл. 7.1.
8. Повторить п.п. 1-7 5...7 раз.
9. Найти среднее арифметическое измеренных значений коэффициента теплопроводности по формуле:

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum \lambda_i}{n}, \quad (3)$$

где $\bar{\lambda}$ – среднее арифметическое значение коэффициента теплопроводности, $Вт/(м \cdot К)$;

λ_i – измеренные значения коэффициента теплопроводности, $Вт/(м \cdot К)$;

n – число измерений.

10. Определить среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\lambda_i - \bar{\lambda})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (4)$$

11. Рассчитать систематическую составляющую погрешности:

$$\Delta_C = \left| \frac{\bar{\lambda} - \lambda_0}{\lambda_0} \right| \cdot 100\% \quad (5)$$

где λ_0 – значение коэффициента теплопроводности образцовой меры для температуры, при которой измерялась теплопроводность, $Вт/(м \cdot К)$.

Коэффициент теплопроводности образцовых мер (λ , $Вт/м \cdot К$) при фиксированной температуре (T , $К$) можно вычислить по следующим формулам:

– для нержавеющей стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-72)

$$\lambda_0 = 9,94 + 0,0159 \cdot T, \quad (6)$$

– для низкоуглеродистой стали 10895

$$\lambda_0 = 49,47 + 0,018 \cdot T \quad (7)$$

– для сплава ВТ-6 (ГОСТ 19807-74)

$$\lambda_0 = 2,294 + 0,0147 \cdot T, \quad (8)$$

– для органического стекла (ГОСТ 17622-72)

$$\lambda_0 = 0,165 + 0,0001 \cdot T \quad (9)$$

Таблица 7.1.

Материал образца	Температура, K	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$		$(\lambda_i - \bar{\lambda})$	$(\lambda_i - \bar{\lambda})^2$	σ	Δ_c
		эсп.	табл.				

5. ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ

Отчет по выполненной работе должен содержать следующее:

1. Краткое описание работы.
2. Принципиальную схему установки.
3. Таблицу испытания (табл. 7.1).
4. Обработку результатов опыта.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как формулируется закон Фурье?
2. Что такое тепловой поток и плотность теплового потока?
3. Что такое температурный градиент?
4. Каков физический смысл коэффициента теплопроводности и его значение для газов, жидкостей и металлов?
5. Какие процессы переноса теплоты называются стационарными и какие нестационарными?

7. ЛИТЕРАТУРА

1. Теплотехника. Учебник для ВУЗов (В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер. – М.: Высшая школа, 1999 г.
2. Теплотехника. Под ред. В.Н. Крутова. – М.: Высшая школа, 1986 г.
3. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высшая школа, 1980 г.